



**C** O L L E C T I O N  
D I R I G É E P A R J E A N B O R N A R E L

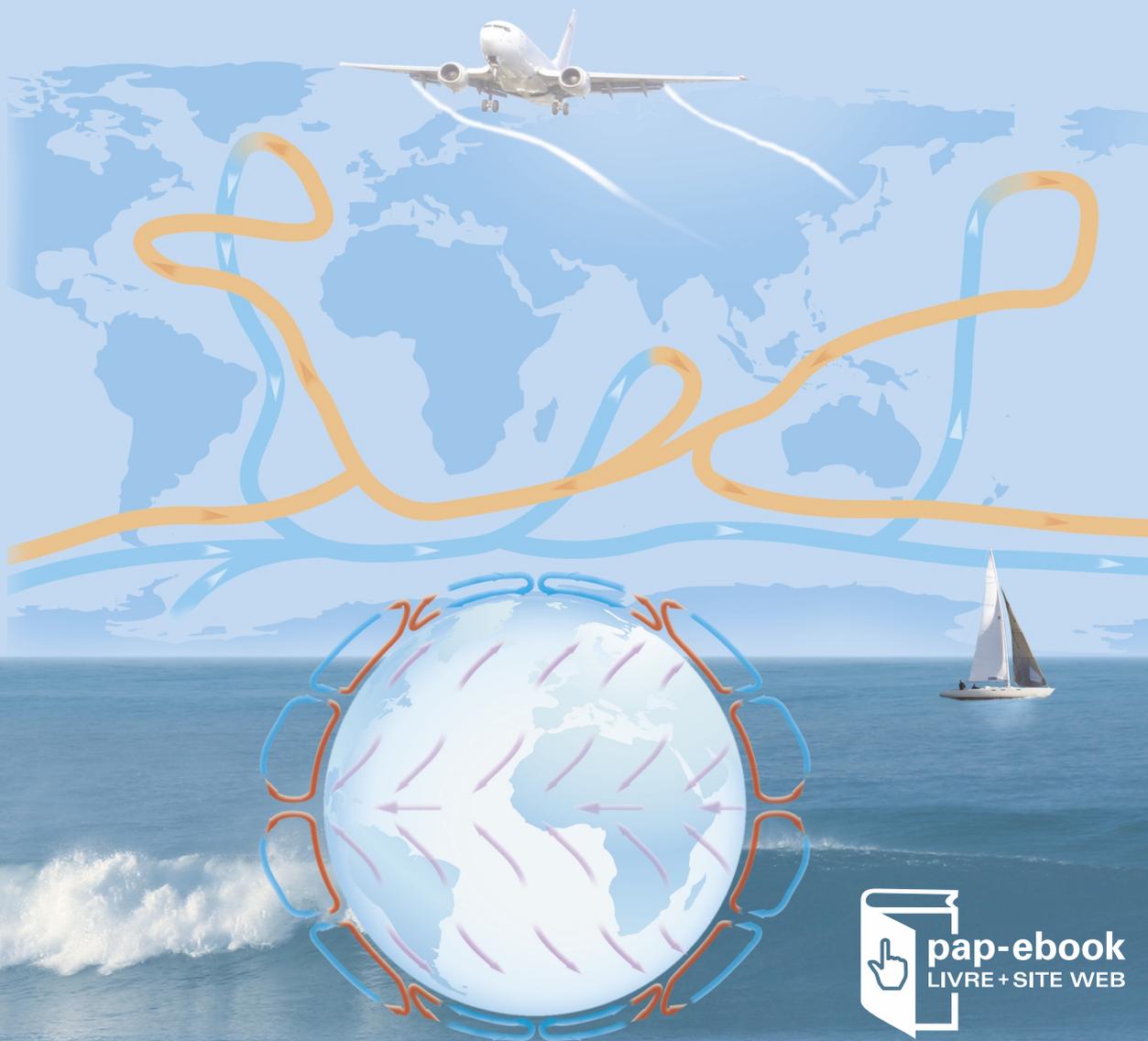
**G** R E N O B L E

**S** C I E N C E S

# L'AIR ET L'EAU

**Alizés, cyclones, Gulf Stream, tsunamis  
et tant d'autres curiosités naturelles**

**René MOREAU**



**L'AIR ET L'EAU**

## Grenoble Sciences

Grenoble Sciences est un centre de conseil, expertise et labellisation de l'enseignement supérieur français. Il expertise les projets scientifiques des auteurs dans une démarche à plusieurs niveaux (référé anonyme, comité de lecture interactif) qui permet la labellisation des meilleurs projets après leur optimisation. Les ouvrages labellisés dans une collection de Grenoble Sciences ou portant la mention « Sélectionné par Grenoble Sciences » (« *Selected by Grenoble Sciences* ») correspondent à :

- des projets clairement définis sans contrainte de mode ou de programme,
- des qualités scientifiques et pédagogiques certifiées par le mode de sélection (les membres du comité de lecture interactif sont cités au début de l'ouvrage),
- une qualité de réalisation assurée par le centre technique de Grenoble Sciences.

### Directeur scientifique de Grenoble Sciences

Jean BORNAREL, Professeur à l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1

On peut mieux connaître Grenoble Sciences en visitant le site web :

<http://grenoble-sciences.ujf-grenoble.fr>

On peut également contacter directement Grenoble Sciences :

Tél (33) 4 76 51 46 95, e-mail : [grenoble.sciences@ujf-grenoble.fr](mailto:grenoble.sciences@ujf-grenoble.fr)

### Livres et pap-ebooks

Grenoble Sciences labellise des livres papier (en langue française et en langue anglaise) mais également des ouvrages utilisant d'autres supports. Dans ce contexte, situons le concept de **pap-ebooks** qui se compose de deux éléments :

- un **livre papier** qui demeure l'objet central avec toutes les qualités que l'on connaît au livre papier
- un **site web corrélé** ou **site web compagnon** qui propose :
  - des éléments permettant de combler les lacunes du lecteur qui ne posséderait pas les prérequis nécessaires à une utilisation optimale de l'ouvrage
  - des exercices de training
  - des compléments permettant d'approfondir, de trouver des liens sur internet, etc.

Le livre du pap-ebook est autosuffisant et nombreux sont les lecteurs qui n'utiliseront pas le site web compagnon. D'autres pourront l'utiliser et ce, chacun à sa manière. Un livre qui fait partie d'un pap-ebook porte en première de couverture un logo caractéristique et le lecteur trouvera le site compagnon du présent livre à l'adresse internet suivante :

<http://grenoble-sciences.ujf-grenoble.fr/pap-ebooks/moreau>

Grenoble Sciences bénéficie du soutien du

**Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche** et de la **Région Rhône-Alpes**.

Grenoble Sciences est rattaché à l'**Université Joseph Fourier de Grenoble**.

ISBN 978 2 7598 0828 1

© EDP Sciences 2013

# **L' AIR ET L' EAU**

**Alizés, cyclones, Gulf Stream, tsunamis  
et tant d'autres curiosités naturelles**

**René MOREAU**

 **edp sciences**

17, avenue du Hoggar  
Parc d'Activité de Courtabœuf - BP 112  
91944 Les Ulis Cedex A - France

## L'air et L'eau

Cet ouvrage, labellisé par Grenoble Sciences, est un des titres du secteur Sciences de la matière de la Collection Grenoble Sciences (EDP Sciences), qui regroupe des projets originaux et de qualité. Cette collection est dirigée par **Jean BORNAREL**, Professeur à l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1.

### Comité de lecture de l'ouvrage :

- Jean BORNAREL, Professeur émérite à l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1
- Jean-Pierre HULIN, Directeur de recherche émérite CNRS, laboratoire Fluides, Automatique et Systèmes Thermiques, Orsay
- James LEQUEUX, Astronome émérite à l'observatoire de Paris
- Jean LILENSTEN, directeur de recherche CNRS, Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble
- Robert LUFT, Professeur retraité de l'Université de Nice Sophia Antipolis
- Jean-Yves MERINDOL, Directeur de l'ENS Cachan, Professeur à l'Université de Strasbourg
- José TEIXEIRA, Directeur de recherche CNRS, laboratoire Léon Brillouin, Paris

Cet ouvrage a été réalisé par Anne-Claire LECOMTE ([www.studiographisme.fr](http://www.studiographisme.fr)).

L'illustration de couverture est l'œuvre d'Alice GIRAUD, d'après : des éléments fournis par l'auteur, des éléments et réalisations d'Alice GIRAUD ainsi qu'une photo de tornade (© Météo France/ Michel LUCIANI).

### Autres ouvrages labellisés sur des thèmes proches (chez le même éditeur) :

La Turbulence (*M. Lesieur*) • Turbulence et déterminisme (*M. Lesieur en collaboration avec l'institut universitaire de France*) • La Cavitation. Mécanismes physiques et aspects industriels (*J. P. Franc et al.*) • Énergie et environnement. Les risques et les enjeux d'une crise annoncée (*B. Durand*) • L'énergie de demain (*Groupe Énergie de la Société Française de Physique Sous la direction de Jean-Louis Bobin, Elisabeth Huffer & Hervé Nifenecker*) • Les milieux aérosols et leurs représentations (*A. Mailliat*) • En physique, pour comprendre (*L. Viennot*) • Naissance de la Physique (*M. Soutif*) • L'Asie, source de sciences et de techniques (*M. Soutif*) • Du soleil à la terre. Aéronomie et météorologie de l'espace (*J. Liliensten & P.L. Blelly*) • Sous les feux du Soleil, vers une météorologie de l'espace (*J. Liliensten & J. Bornarel*) • Mécanique - De la formulation lagrangienne au chaos hamiltonien (*C. Gignoux & B. Silvestre-Brac*) • Problèmes corrigés de mécanique et résumés de cours. De Lagrange à Hamilton (*C. Gignoux & B. Silvestre-Brac*) • Introduction à la mécanique statistique (*E. Belorizky & W. Gorecki*) • Mécanique Statistique. Exercices et problèmes corrigés (*E. Belorizky & W. Gorecki*) • Description de la symétrie. Des groupes de symétrie aux structures fractales (*J. Sivardière*) • Symétrie et propriétés physiques. Des principes de Curie aux brisures de symétrie (*J. Sivardière*) • Magnétisme : I Fondements, II Matériaux (*Sous la direction d'E. du Trémolet de Lacheisserie*) • Spectroscopie de résonance paramagnétique électronique, fondements (*P. Bertrand*) • Spectroscopies infrarouge et Raman (*R. Poilblanc & F. Crasnier*) • La Mécanique Quantique. Problèmes résolus, Tome I et II (*V.M. Galitski, B.M. Karnakov & V.I. Kogan*) • Physique des diélectriques (*D. Gignoux & J.C. Peuzin*) • Physique des plasmas collisionnels. Applications aux décharges hautes fréquences (*M. Moisan & J. Pelletier*) • Physique et Biologie (*B. Jacrot*) • Éléments de Biologie à l'usage d'autres disciplines, de la structure aux fonctions (*Philippe Tracqui & Jacques Demongeot*) • Sciences expérimentales et connaissance du vivant. La méthode et les concepts (*Pierre Vignais & Paulette Vignais*) • La biologie des origines à nos jours (*Pierre Vignais*) •

et d'autres titres sur le site internet :

<http://grenoble-sciences.ujf-grenoble.fr>

# Guide de lecture

Comme tous les pap-ebooks de la collection Grenoble-sciences, cet ouvrage comporte à la fois un livre, qui peut se lire seul, de façon autonome, et le site web qui lui est associé pour l'étayer et le compléter. Le **livre** lui-même a pour objectif principal de guider le regard du lecteur sur la plupart des phénomènes observables dans l'air et dans l'eau. Les chemins qui conduisent à leur compréhension y sont balisés, et les pas du lecteur le long de cet itinéraire sont illustrés par de nombreux exemples. Les explications détaillées, qui interrompraient la promenade, sont reportées sur le **site associé**. Toutefois, certaines notions que l'auteur estime indispensables pour la compréhension de phénomènes importants sont présentées dans des **encarts** spécialisés, insérés dans les premiers chapitres, comme des clés proposées au lecteur qui se sentirait arrêté devant des portes closes. Les **notes en bas de page** apportent aussi quelques compléments, toujours brefs, de nature étymologique, bibliographique, géographique, ou encore historique.

La compréhension approfondie de ces deux milieux, l'air et l'eau, exigerait de faire appel à toutes les disciplines scientifiques, et plus particulièrement à la mécanique des fluides. Or ce domaine n'est pas abordé dans le cursus scolaire et universitaire avant les programmes de la licence ou des classes préparatoires aux grandes écoles. L'auteur a néanmoins fait le pari de proposer dans ce livre un premier niveau d'explication accessible sans formation avancée. Les notions qui touchent à des aspects relativement subtils, comme les mécanismes des instabilités hydrodynamiques et de la turbulence, sont donc reportées dans une **annexe**, qui constitue une sorte de base commune aux huit chapitres du livre, elle aussi présentée sans équations ni concepts abstraits. Enfin, en raison de l'abondance du vocabulaire nécessaire pour décrire ces phénomènes, un **glossaire** assez détaillé est proposé, où le lecteur trouvera la signification de la plupart des termes scientifiques utilisés. Lors de sa première occurrence dans l'un des chapitres, dans l'épilogue, ou dans l'annexe, chaque mot du glossaire apparaît en couleur bleue, de façon à informer le lecteur qu'un commentaire sur sa signification est disponible à la fin du livre.

Le lecteur disposant d'une culture scientifique avancée, qui se sentirait dérouté par la brièveté de certaines explications, ou qui estimerait leur simplicité excessive, pourra rechercher des compléments sur le site associé. Leur lecture requiert une certaine pratique des démarches de la physique théorique, qui s'appuient sur les grands principes et font appel à des outils mathématiques comme les équations aux dérivées partielles et l'analyse vectorielle. Ils comprennent des rappels sur les bases utiles pour une compréhension approfondie, des justifications de lois physiques évoquées dans le livre, ainsi que des informations sur les techniques expérimentales.

<http://grenoble-sciences.ujf-grenoble.fr/pap-ebooks/moreau>

# Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier les étudiants, élèves ingénieurs, doctorants et collègues, qui, tout au long de ma carrière, m'ont poussé par leurs questions et leurs commentaires à rechercher des explications aussi simples que possible à tous les phénomènes observables dans les milieux fluides comme l'air, l'eau et bien d'autres encore. Ce sont eux qui, en m'amenant à réaliser que le comportement de ces fluides était descriptible avec les mots du langage courant, m'ont permis d'imaginer ce livre.

Mes remerciements vont aussi aux membres du comité de lecture. Leurs suggestions très constructives ont conduit à une réelle amélioration du manuscrit initial.

Je tiens également à remercier les personnes, les photographes, les entreprises et les organismes qui m'ont gracieusement fourni, ou qui m'ont aidé à obtenir, de nombreuses photographies et illustrations montrant à la fois des phénomènes naturels spectaculaires et des réalisations de grands ouvrages. Si la présentation de ce livre est relativement attrayante c'est grâce à leurs contributions.

Je suis particulièrement reconnaissant à l'équipe de Grenoble Sciences qui, sous la direction de Jean BORNAREL, a mis cet ouvrage sous sa forme définitive, ce qui n'était pas chose facile compte-tenu des encarts et des nombreuses figures. Notamment, Laura CAPOLO, Sylvie BORDAGE et Anne-Laure PASSAVANT, ainsi qu'Anne-Claire LECOMTE et Alice GIRAUD, ont fait preuve d'un réel professionnalisme et de beaucoup de patience à mon égard pendant les mois qui ont précédé la parution du livre et l'édition du site web associé.

Vj ku' r ci g' k p v g p v k p p c m ( ' i g h v ' d i r p m

# Table des matières

<b>Prologue.....</b>	<b>1</b>
<b>1. L'atmosphère au repos.....</b>	<b>5</b>
1. Structure de l'atmosphère.....	7
2. Composition de l'atmosphère.....	13
3. Propagation des ondes dans l'atmosphère.....	21
3.1. Le son.....	21
3.2. La lumière.....	22
4. Thermique de l'atmosphère.....	28
Conclusion.....	34
<b>2. L'atmosphère en mouvement.....</b>	<b>35</b>
1. Circulation atmosphérique aux grandes échelles.....	37
1.1. Les alizés, la cellule de HADLEY et le <i>jet stream</i> .....	37
1.2. Cellules polaires et cellule de FERREL.....	44
2. Dépressions atmosphériques et cyclones.....	45
2.1. Formation et sens de rotation des dépressions atmosphériques.....	45
2.2. Structure quasi-bidimensionnelle des dépressions.....	54
2.3. Transit et énergie des dépressions.....	61
3. Phénomènes périodiques dans l'atmosphère.....	65
3.1. Les moussons.....	66
3.2. La cellule de WALKER.....	68
3.3. Vents thermiques, vents catabatiques et vents anabatiques.....	68
3.4. Ciels pommelés et ondes de relief.....	72
Conclusion.....	74
<b>3. Les caprices de l'atmosphère.....</b>	<b>77</b>
1. Naissance et évolution des orages et des tornades.....	79
1.1. Dynamique des formations orageuses.....	79
1.2. Formation des tornades.....	82
2. Signatures sonores et lumineuses des orages.....	89
2.1. Les éclairs.....	90
2.2. Le tonnerre.....	95
2.3. Les lueurs de la haute atmosphère.....	96
2.4. L'arc en ciel.....	98

3. Les diverses précipitations . . . . .	100
4. Comment les prévisions météorologiques sont-elles élaborées ? . . . . .	108
Conclusion . . . . .	110
<b>4. Plus lourds que l'air, comment peuvent-ils voler ? . . . . .</b>	<b>113</b>
1. Portance et traînée . . . . .	115
1.1. La portance expliquée par le bilan des pressions . . . . .	115
1.2. Présence d'un tourbillon autour d'une aile volante . . . . .	118
2. Pourquoi les avions sont-ils aussi bruyants ? . . . . .	126
3. Onde de choc et mur du son . . . . .	129
Conclusion . . . . .	132
<b>5. La mer tranquille . . . . .</b>	<b>133</b>
1. La mer au repos . . . . .	135
1.1. Premier aperçu panoramique . . . . .	135
1.2. Pression, température et salinité des mers . . . . .	138
1.3. La mer n'est ni plate ni ronde . . . . .	143
2. Le son et la lumière dans l'eau de mer . . . . .	146
3. La remarquable stabilité des navires . . . . .	148
4. La circulation océanique globale . . . . .	152
Conclusion . . . . .	156
<b>6. La mer qu'on voit danser . . . . .</b>	<b>159</b>
1. Les marées . . . . .	161
2. Le phénomène <i>El Niño</i> . . . . .	167
3. La houle et les vagues . . . . .	170
3.1. Pourquoi et comment les vagues se propagent-elles ? . . . . .	170
3.2. L'étonnante diversité des vagues . . . . .	175
3.3. Vaguelettes et instabilités convectives sous la banquise . . . . .	182
Conclusion . . . . .	184
<b>7. Fleuves et rivières . . . . .</b>	<b>187</b>
1. Les principales propriétés des grands fleuves . . . . .	189
1.1. Longueur, profondeur et distribution de vitesse . . . . .	189
1.2. Le régime uniforme . . . . .	191
1.3. Les régimes non-uniformes . . . . .	193
2. Courbes et méandres . . . . .	201
3. Chutes et cascades . . . . .	204
Conclusion . . . . .	206

<b>8. Lacs, retenues et grands ouvrages</b> .....	<b>207</b>
1. Des marais aux retenues hydroélectriques. ....	209
2. Les grands barrages : adaptation au site et équilibre .....	215
3. L'aménagement des grands fleuves. ....	220
4. Structure générale d'un aménagement hydroélectrique .....	224
4.1. Haute chute dans un massif montagneux .....	224
4.2. Chute de hauteur moyenne. ....	228
4.3. Installations de basse chute .....	229
4.4. Autres aménagements. ....	230
5. Les grands ouvrages portuaires. ....	231
Conclusion. ....	235
<b>Epilogue</b> .....	<b>237</b>
1. Quelles inquiétudes et sur quoi sont-elles fondées ? .....	239
1.1. Pollution de l'air .....	240
1.2. Pollution du milieu marin. ....	242
1.3. Ressource en eau douce .....	244
2. Pour conclure notre promenade .....	245
<b>Annexe - Instabilités et turbulence</b> .....	<b>247</b>
1. Apparition soudaine d'un mouvement .....	250
1.1. Instabilité de RAYLEIGH-BÉNARD .....	250
1.2. Instabilité de RAYLEIGH-TAYLOR .....	253
2. Instabilité des interfaces cisailées ou instabilité de KELVIN-HELMHOLTZ .....	256
3. Autres structures tourbillonnaires courantes .....	260
4. Transition vers la turbulence .....	263
4.1. Apparition de la turbulence dans les écoulements non confinés. ....	263
4.2. Transition vers la turbulence dans les écoulements en conduites .....	265
4.3. Autres modes d'excitation de la turbulence .....	266
5. Turbulence pleinement développée. ....	267
5.1. La turbulence des écoulements les plus courants .....	267
5.2. La turbulence atmosphérique à grande échelle .....	268
5.3. La cascade inverse d'énergie en turbulence bidimensionnelle. ....	272
Conclusion. ....	275
<b>Glossaire</b> .....	<b>277</b>
<b>Index</b> .....	<b>297</b>

Vj ku' r ci g' k p v g p v k p p c m ( ' i g h v ' d i r p m

# Prologue

*Le commencement de toutes les sciences,  
c'est l'étonnement de ce que les choses sont ce qu'elles sont.*

(ARISTOTE)

Vj ku' r ci g' k p v g p v k p p c m ( ' i g h v ' d i r p m

L'air et l'eau sont les deux fluides essentiels à la vie. Depuis les premiers apprentissages de notre enfance, ils nous sont devenus tellement familiers que chacun croit les connaître. Et pourtant, qu'il est difficile d'en prédire le comportement, combien de questions se heurtent aux limites de nos connaissances ! Peut-on expliquer avec précision le vent, les orages et les tempêtes ? Pourquoi pleut-il ici et non pas là ? L'été prochain sera-t-il caniculaire ou, au contraire, fort agréable ? La mer sera-t-elle belle ou démontée ? D'où viennent donc ces vagues qui, sans cesse, viennent s'abattre sur nos rivages ?

Les ingénieurs et techniciens en formation, amenés à visiter de grands aménagements hydrauliques, portuaires ou aéroportuaires, ont l'occasion d'exercer leur regard sur ces milieux fluides toujours en mouvement. En comprenant de mieux en mieux l'origine des phénomènes, ils admirent de plus en plus le prodigieux spectacle de cette nature animée. Progressivement, leur intérêt croît et, en retour, leur compréhension des phénomènes cultive chez eux un réel désir de maîtriser les outils qui permettent de les analyser. En dehors des milieux scientifiques et techniques, cette attitude réjouit aussi tous les visiteurs de ces sites spectaculaires. Leurs accompagnateurs, habitués à expliquer la puissance d'une chute d'eau sans équation ni concept abstrait, sont amenés à les guider dans une démarche qui implique de regarder, voire d'observer, ce qui engage beaucoup plus et apprend bien davantage que de simplement voir.

Qu'il s'agisse de l'air ou de l'eau, la promenade proposée au lecteur commence par une présentation du milieu supposé au repos, puis se poursuit par l'examen de ses pulsions incessantes et difficilement prévisibles. D'abord centré sur les plus grandes échelles, celles de la planète entière, cet itinéraire mène ensuite vers des structures de moins en moins grandes, comme celles des dépressions atmosphériques, des nuages, de la pluie, ainsi que celles des marées et des vagues. Il conduit aussi le long de l'immense réseau de cours d'eau qui drainent et irriguent les continents, et donne l'occasion d'admirer de magnifiques ouvrages, comme les barrages construits au fil de l'eau, et de s'interroger à propos de leur impact sur les territoires voisins. L'idée centrale de ce livre consiste donc à observer des phénomènes naturels et à proposer des explications relativement simples adressées à un large public soucieux de son environnement.

La majeure partie du texte est accessible à des lecteurs ne disposant pas de connaissances plus avancées que celles du baccalauréat scientifique, pour qui des grandeurs comme la température du fluide, ou la pression au sein de ce milieu, sont déjà familières. Toutefois, l'explication de certains phénomènes requiert l'usage de

notions plus avancées et d'une formation universitaire. Pour ne pas interrompre la promenade, ces notions ont été isolées dans des encarts insérés dans les chapitres auxquels ils se rapportent. Le lecteur non initié devra passer outre, sans s'inquiéter, en admettant qu'il se prépare à acquérir ces notions à partir des exemples présentés. Pour répondre aux attentes de lecteurs possédant déjà une formation scientifique avancée, le site web compagnon de ce livre propose aussi quelques compléments : des justifications théoriques pour ceux qui aiment manipuler les équations, quelques informations sur les techniques expérimentales.

Dans le texte principal les équations sont donc abandonnées, mais quelques chiffres essentiels sont rappelés pour situer les ordres de grandeur des phénomènes discutés et mettre en place des repères utiles. À titre d'exemple, il est en effet important de réaliser que les temps caractéristiques des mouvements atmosphériques sont au plus de l'ordre de la semaine, alors que ceux de l'océan dépassent le millénaire : la grande circulation du *Gulf stream* met environ 1600 ans pour accomplir son tour du monde ! À propos des interactions entre l'atmosphère et l'océan, nous aborderons la météorologie et nous côtoierons le thème de la climatologie, objet de recherches importantes en période de réchauffement climatique. L'intention consiste à situer les bases scientifiques de ces grands défis, en les limitant à des aspects bien établis, mais sans entrer dans leur traitement détaillé.

En somme, j'aimerais laisser au lecteur l'impression que je lui raconte une belle histoire et lui transmettre une parcelle de mon émerveillement. De ce point de vue, qu'il me soit permis d'évoquer Jules VERNE, à mes yeux l'un des maîtres de l'attitude émerveillée devant la connaissance scientifique. Ses *Voyages extraordinaires* ont tellement intéressé l'enfant que j'ai été, que je souhaite citer les deux volumes les plus proches de l'objet de ce livre, auxquels sont empruntées les citations placées en exergue des chapitres 2 et 5 : *Cinq semaines en ballon* et *Vingt mille lieues sous les mers*. Sa vision relevait, certes, plus du rêve que de la compréhension scientifique proposée dans cet ouvrage. Puisse ce livre aider les lecteurs à poursuivre leurs propres démarches, mêlant éventuellement le rêve à la réalité, après avoir lu cette description raisonnée des phénomènes observables dans l'air et dans l'eau.

L'auteur

## Chapitre 1

# L'atmosphère au repos

*L'air est plein du frisson des choses qui s'enfuient.*

(Charles BAUDELAIRE, *Tableaux parisiens*)

Vj ku' r ci g' k p v g p v k p p c m ( ' i g h v ' d i r p m

La planète Terre a la forme d'une sphère légèrement aplatie aux pôles. Son rayon moyen est voisin de 6370 km et le périmètre équatorial est proche de 40000 km. L'atmosphère, remplie par ce merveilleux mélange gazeux que l'on appelle *l'air*, est son enveloppe externe où vit l'humanité accompagnée de très nombreuses espèces animales et végétales. Sans cesse, nous respirons cet air, nous nous y déplaçons, nos regards le traversent, et nous en acceptons les aléas météorologiques. Aussi familière qu'elle nous paraisse, aussi indispensable à la vie qu'elle soit, connaissons-nous vraiment cette atmosphère ? Pourtant, les informations recueillies au fil des siècles, devenues de plus en plus précises au cours de l'aventure aérospatiale, permettent maintenant de bien connaître ce milieu et d'en comprendre les principales propriétés. Engageons nous donc dans son observation, en nous limitant dans ce chapitre à une première approximation, celle d'une atmosphère au repos.

## 1. Structure de l'atmosphère

Les confins de l'atmosphère se perdent à très grande distance dans deux régions où la matière est tellement raréfiée, qu'il est souvent justifié de les considérer comme presque vides : la **magnétosphère** et l'**hétérosphère** (voir encart E1.1). Aussi éloignée soit-elle, la magnétosphère, dans laquelle se referment les lignes de flux du champ magnétique terrestre, n'est pas sans influence sur la Terre puisqu'elle constitue le bouclier qui la protège du rayonnement cosmique en provenance du soleil, incompatible avec la vie. Parce qu'elle est soufflée vers l'aval par le **vent solaire**<sup>1</sup>, son épaisseur est très variable entre le côté jour, où elle atteint plusieurs milliers de kilomètres, et le côté nuit, où elle se referme à des distances beaucoup plus grandes dans le sillage engendré par la Terre au sein de ce vent solaire. Et l'hétérosphère, où les concentrations des diverses espèces deviennent extrêmement faibles, moins de  $10^5$  fois inférieures à leur concentration au sol, constitue la transition entre l'espace et la Terre

---

1 Le vent solaire est un flux de particules élémentaires émises par le soleil, essentiellement des protons et des électrons. L'énergie des particules les plus lourdes, les protons, est située dans une gamme allant de 100 eV, ce qui correspond à une vitesse d'environ  $500 \text{ km s}^{-1}$ , à 10 MeV, ce qui correspond à  $50000 \text{ km s}^{-1}$ . L'électron-volt (eV) est une unité d'énergie hors du système international, mais adaptée à la physique des particules élémentaires (1 eV est équivalent à  $1,60217653 \times 10^{-19} \text{ J}$ , 1 keV représente  $10^3 \text{ eV}$ , 1 MeV représente  $10^6 \text{ eV}$ ). Les aurores boréales sont une manifestation de l'entrée dans l'atmosphère des très rares particules qui ont pu traverser la magnétosphère ; elles ne se produisent que dans les régions polaires où la direction du champ magnétique est presque perpendiculaire au sol.

- M**
- MACH (Ernst)..... 131  
 cône de - ..... 131  
 nombre de - ..... 131  
 magnétosphère..... 7, 9  
 Manche ..... 137, 163, 166  
 maquette..... 197  
 marais..... 209  
 marée ..... 161, 165, 230  
 marnage ..... 163, 231  
 mascaret..... 199  
 masse ..... 17, 40, 106  
 - nuageuse..... 79  
 méandre ..... 201, 203  
 mer..... 135, 161  
 - Baltique ..... 137  
 - Caspienne..... 137  
 - d'Aral ..... 137  
 - de Marmara..... 138  
 - des Caraïbes ..... 137  
 - du Nord ..... 137  
 - Méditerranée ..... 136, 145  
 - Morte ..... 137  
 - Noire ..... 137  
 mésosphère ..... 8, 19  
 métacentre ..... 151  
 météorologie ..... 108, 152  
 méthane ..... 240  
 microcentrale ..... 231  
 MIE (Gustav) ..... 24  
 MILANKOVITCH (Milutin) ..... 28  
 cycle de - ..... 28  
 mode..... 173  
 - principal..... 173  
 moment  
 - cinétique..... 39, 48, 50, 86, 273  
 - dipolaire électrique ..... 32  
 monoxyde de carbone ..... 241  
 mousson..... 66  
 - d'été..... 66  
 - d'hiver ..... 67  
 mouvement ..... 40  
 quantité de - ..... 50, 51
- N**
- navigation ..... 223  
 neige ..... 103  
 niveau  
 - de la mer ..... 143  
 - moyen des océans ..... 143
- nombre  
 - d'AVOGADRO..... 106  
 - de BOND..... 254  
 - de FROUDE..... 196  
 - de MACH..... 131  
 - de RAYLEIGH ..... 69, 250  
 - de REYNOLDS..... 51, 55, 83, 120  
 - de ROSSBY..... 57  
 - de STROUHAL..... 263
- O**
- océan  
 - Antarctique..... 136, 167  
 - Arctique..... 136  
 - Atlantique..... 136, 152, 163  
 - Indien ..... 136  
 - Pacifique..... 136  
 - Téthys ..... 136  
 onde..... 170  
 - acoustique ..... 21  
 - de choc..... 95, 115, 129, 257  
 - de gravité ..... 171, 183, 193  
 - de relief ..... 72, 74  
 - inertielle..... 56, 58, 262, 269  
 longueur d' - ..... 171, 181  
 - solitaire ..... 179  
 - sonore ..... 146  
 - stationnaire..... 177  
 orage..... 79, 81  
 ordre de grandeur..... 16  
 oxyde d'azote..... 241  
 ozone ..... 241  
 couche d' - ..... 18
- P**
- pale ..... 197, 230  
 panache..... 253  
 Pangée ..... 136  
 paratonnerre..... 94  
 période..... 162, 171, 173  
 - propre ..... 161  
 photon ..... 22, 32  
 phytoplancton ..... 148, 169  
 pluie ..... 101  
 poids ..... 40, 115  
 pollution ..... 239  
 - de l'air ..... 240  
 - du milieu marin..... 242  
 pont ..... 197, 200, 233  
 port ..... 209, 231  
 portance ..... 40, 115, 132

- potentiel hydrogène ..... 143  
 poussée d'ARCHIMÈDE ..... 38, 40, 115, 183  
 précipitation ..... 71, 100  
 prévision météorologique ..... 108, 110  
 probabilité ..... 110  
 profondeur critique ..... 194, 197
- Q**
- quantité  
   - de chaleur ..... 107  
   - de mouvement ..... 50, 106, 116, 174
- R**
- RAYLEIGH (John William Strutt) ..... 24, 250  
   - -BÉNARD ..... 69, 250  
 rayon ..... 98, 99  
   - infrarouge ..... 23  
   - ultraviolet ..... 22  
 rayonnement ..... 9, 30, 80  
 raz-de-marée ..... 181  
 réchauffement climatique ..... 29, 166, 240  
 référentiel ..... 40  
   - absolu ..... 40  
   - galiléen ..... 40, 48  
 réflexion ..... 98  
 réfraction ..... 25, 27, 98  
   indice de - ..... 26  
 régime  
   - graduellement varié ..... 194, 197  
   - torrentiel ..... 193, 199  
   - uniforme ..... 192  
 ressaut ..... 178, 197, 199, 257  
 retenue ..... 210, 212  
 REYNOLDS (Osborne) ..... 51, 265  
   nombre de - ..... 51, 55, 120, 128, 262  
 rides capillaires ..... 182  
 risée ..... 182  
 rosée ..... 102  
 ROSSBY (Carl-Gustaf Arvid) ..... 57  
   nombre de - ..... 57  
 roue ..... 210  
   - à aubes ..... 227  
 rouleau ..... 252  
 roulis ..... 149  
 ruissellement ..... 243
- S**
- salinité ..... 138, 141, 154, 184  
 sel marin ..... 142  
 serre  
   effet de - ..... 29, 32, 142, 240
- seuil ..... 194, 197, 266  
 similitude ..... 196  
 solaire  
   irradiance - ..... 28  
   vent - ..... 7  
 Soleil ..... 161  
 soliton ..... 179  
 solstice ..... 37, 164  
 son ..... 21, 146  
   célérité du - ..... 21, 126, 146  
   mur du - ..... 115, 131  
 sonar ..... 146  
 sous-marin ..... 149, 150  
 spectre ..... 22, 173  
   - de raies ..... 173  
*sprites* ..... 97  
 statistique ..... 110  
 stratification ..... 268  
 stratopause ..... 8  
 stratosphère ..... 8, 15  
 structure  
   - colonnaire ..... 269  
   - cyclonique ..... 271  
   - dendritique ..... 103  
   - quasi-bidimensionnelle ..... 54  
   - turbulente ..... 269  
 subsonique ..... 131  
 sulfure d'hydrogène ..... 243  
 supersonique ..... 129, 131  
 surfusion ..... 102  
 sylphe ..... 97
- T**
- tangage ..... 148  
 TAYLOR (Sir Geoffrey Ingram) ..... 60  
   colonne de - ..... 56, 60, 262, 266  
 tensiomètre ..... 104  
 tension  
   - de vapeur saturante ..... 14, 61, 86  
   - superficielle ..... 105, 107, 182, 254  
 tétrapode ..... 233  
 théorie cinétique des gaz ..... 15, 17  
 thermique  
   - de l'atmosphère ..... 28  
   équilibre - ..... 29  
   vent - ..... 68  
 thermocline ..... 140, 147, 167, 255  
 tonnerre ..... 89, 95  
 tornade ..... 79, 82, 87, 255  
 torrentiel ..... 193